

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Energi Angin**

Energi merupakan suatu kekuatan yang dimiliki oleh suatu zat sehingga zat tersebut mempunyai pengaruh pada keadaan sekitarnya. Menurut mediumnya dikenal banyak jenis energi, diantaranya energi gelombang, energi arus laut, energi kosmos, energi yang terkandung pada senyawa atom, dan energi-energi lain yang bila dimanfaatkan akan berguna bagi kehidupan manusia. Salah satunya adalah energi angin yang jumlahnya sangat tak terbatas dan banyak dimanfaatkan untuk meringankan kerja manusia. Angin memberikan energi gerak sehingga mampu menggerakkan kincir angin, perahu layar, dan bahkan dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik berupa turbin angin. Keberadaan energi angin ini terdapat di atmosfer atau lapisan udara bumi yang mengandung banyak partikel udara dan gas.

Kondisi atmosfer atau lapisan udara yang menyelimuti bumi mengandung berbagai macam molekul gas dan terdiri dari beberapa lapisan. Lapisan atmosfer yang paling rendah berupa troposfer. Lapisan troposfer sangat tipis bila dibandingkan dengan diameter bumi. Bumi memiliki diameter sekitar 12.000 km lebih besar dibandingkan troposfer yang memiliki ketebalan 11 km. Pada lapisan troposfer, semua peristiwa cuaca terjadi termasuk angin.

Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara disekitarnya. Angin bergerak dari

tempat bertekanan udara tinggi ke tempat bertekanan udara rendah. Akibat pemanasan oleh matahari, maka udara memuai. Tekanan udara yang telah memuai massa jenisnya menjadi lebih ringan sehingga naik. Apabila hal ini terjadi, tekanan udara turun. Udara disekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah. Udara menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Diatas tanah udara menjadi panas lagi dan naik kembali. Aliran naiknya udara panas dan turunya udara dingin ini dikarenakan konveksi.



**Gambar 2.1: Sirkulasi Udara di Pantai**  
(Sumber : <http://eprints.undip.ac.id>)

## 2.2. Turbin Angin

Turbin angin merupakan salah satu alat yang mekanisme gerakannya memanfaatkan energi angin. Banyak pemakaian turbin angin, khususnya di negara yang sudah maju, digunakan untuk menghasilkan listrik. Turbin angin yang digunakan dapat menghasilkan kapasitas listrik yang cukup tinggi yaitu mencapai ratusan megawatt. Adapun di negara berkembang, penggunaan turbin angin berada dalam skala riset. Hal ini dikarenakan teknologi yang berada di negara tersebut masih dalam tahap pengembangan untuk menghasilkan sebuah turbin angin yang bagus. Oleh karena itu, untuk riset turbin angin akan dicari sebuah

desain dan bahan beserta analisisnya untuk membuat turbin angin yang lebih baik dari sebelumnya.

### 2.2.1 Definisi dan Pengelompokan Turbin Angin

Turbin angin adalah alat yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi gerak berupa putaran rotor dan poros generator untuk menghasilkan energi listrik. Energi gerak yang berasal dari angin akan diteruskan menjadi gaya gerak dan torsi pada poros generator yang kemudian dihasilkan energi listrik. Turbin angin merupakan mesin penggerak yang energi penggeraknya berasal dari angin.

Berdasarkan arah sumbu geraknya, turbin angin terbagi menjadi 2, yaitu turbin angin sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Sedangkan berdasarkan prinsip gaya aerodinamik yang terjadi, turbin angin dibagi menjadi 2, yaitu jenis *lift* dan *drag*.

Pengelompokan berdasarkan prinsip aerodinamik pada rotor yang dimaksud adalah apakah turbin angin menangkap energi angin dengan hanya memanfaatkan gaya drag dari aliran udara yang melalui rotor atau memanfaatkan gaya lift yang dihasilkan dari aliran udara yang melalui bentuk aerodinamis sudu. Dapat dikatakan terdapat turbin angin yang menggunakan rotor jenis drag dan turbin angin yang memanfaatkan rotor jenis lift. Dua kelompok ini memiliki perbedaan yang jelas pada kecepatan putar rotornya. Rotor turbin angin jenis drag berputar dengan kecepatan putar rendah sehingga disebut juga turbin angin putaran rendah. Rotor turbin

angin jenis lift pada umumnya berputar pada kecepatan putar tinggi bila dibandingkan dengan jenis drag sehingga disebut juga sebagai turbin angin putaran tinggi.

Turbin angin digolongkan menjadi dua kelompok berdasarkan arah sumbu gerakanya yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu horizontal memiliki sumbu putar yang sejajar dengan tanah, sedangkan turbin angin sumbu vertikal memiliki sumbu putar yang arahnya tegak lurus dengan tanah. Setiap jenis turbin memiliki perancangan, kelebihan dan kekurangannya masing-masing.

### **2.2.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)**

Turbin angin sumbu horizontal mempunyai sumbu putar yang terletak sejajar dengan permukaan tanah dan sumbu putar rotor yang searah dengan arah angin.

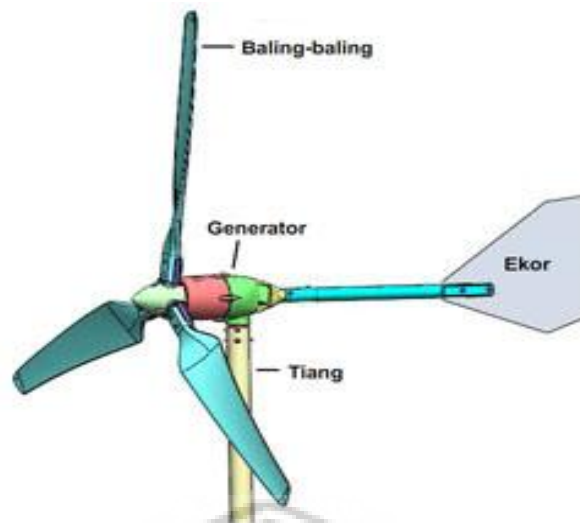
Komponen utama turbin angin sumbu horizontal meliputi sudu (*blade*), ekor (*tail*), tiang penyangga (*tower*), dan alternator. Sudu pada turbin angin sumbu horizontal dibuat dengan material yang ringan supaya momen inersianya kecil sehinggamengakibatkan sudu bisa berputar pada kecepatan angin yang rendah. Misalnya material sudu yang digunakan berasal dari bahan kayu atau serat karbon. Semakin banyak jumlah sudu, semakin cepat putaran poros turbin, tetapi torsinya semakin kecil. Selain itu, banyaknya jumlah sudu menyebabkan turbulensi aliran udara dan tingkat kebisingan akibat efek suara (*noise*) semakin besar. Sebaiknya untuk turbin

angin dipilih sudu yang panjang sehingga torsi yang dihasilkan akan lebih besar. Ekor pada turbin berfungsi untuk menstabilkan kondisi turbin ketika sudu mulai berputar akibat gaya angin. Ekor akan membuat badan turbin selalu bergerak sehingga sudu akan selalu searah dengan arah datangnya angin. Meskipun arah angin selalu berubah-ubah, dengan bantuan ekor akan menyebabkan sudu selalu mengarah sesuai dengan arah datangnya angin. *Tower* adalah tiang penyangga yang menghubungkan perangkat turbin angin dengan permukaan tanah. *Tower* dibuat dengan material yang sangat kuat agar dapat menahan beban akibat gaya berat turbin angin dan gaya dari angin. Sedangkan alternator adalah sejenis generator yang dipasangkan pada turbin angin untuk menghasilkan daya listrik akibat putaran dari poros turbin. Poros turbin dipasang menyatu dengan poros generator (satu poros) atau bisa juga dipasang dengan sistem transmisi roda gigi (lebih dari satu poros).

Berdasarkan letak rotor terhadap arah angin, turbin angin aksial dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. *Upwind*
2. *Downwind*

Turbin angin jenis *upwind* memiliki rotor yang menghadap arah datangnya angin sedangkan turbin angin jenis *downwind* memiliki rotor yang membelakangi arah datangnya angin.



**Gambar 2.2: Turbin Angin Sumbu Horizontal Beserta Komponennya**  
 (Sumber : [Sanfordlegenda.blogspot.co.id](http://Sanfordlegenda.blogspot.co.id) : 2013)

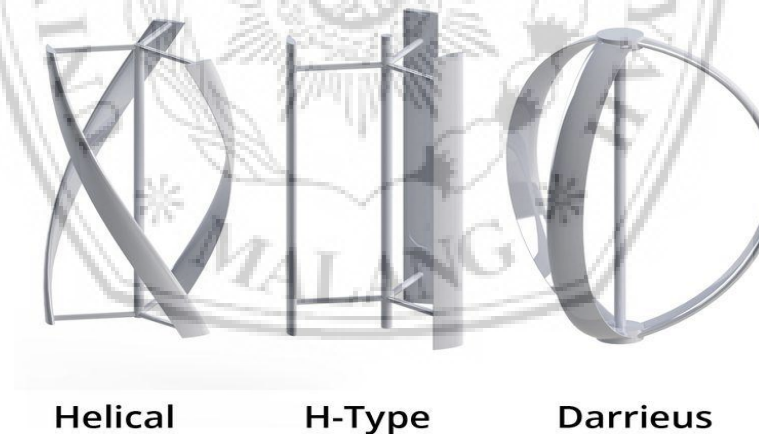
### 2.2.3 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal merupakan jenis turbin angin yang pertama dibuat manusia. Pada awalnya, putaran rotornya hanya memanfaatkan efek *magnus* yaitu karena adanya selisih gaya drag pada kedua sisi rotor atau sudu sehingga menghasilkan momen gaya terhadap sumbu putar rotor. Salah satu contoh turbin angin sumbu vertikal jenis drag adalah turbin angin Savonius, yang mana terdiri dari dua atau tiga lembar pelat yang dilengkungkan pada arah tangensial yang sama terhadap sumbu putar.

Turbin angin sumbu vertikal modern menerapkan bentuk yang aerodinamis pada rotornya untuk menghasilkan momen gaya. Contohnya adalah turbin angin Darrieus. Pada turbin angin Darrieus sudu dibentuk melengkung dan berputar menyapu ruangan seperti tali yang berputar pada sumbu vertikal. Hal ini menyebabkan bentuk geometri sudunya rumit dan

sulit untuk dibuat. Rotor turbin angin Darrieus pada umumnya terdiri dari dua atau tiga sudu. Variasi dari turbin angin Darrieus adalah yang disebut dengan turbin angin H (tipe H), tersusun dari dua atau tiga sudu lurus yang dihubungkan dengan struktur rangka ke poros.

Keuntungan dari konsep turbin angin sumbu vertikal adalah sederhana dalam perancangannya, diantaranya adalah memungkinkan menempatkan komponen mekanik dan komponen elektronik, transmisi roda gigi dan generator dekat dengan permukaan tanah. Rotor turbin angin sumbu vertikal berputar tanpa dipengaruhi arah angin sehingga tidak membutuhkan mekanisme pengatur arah (seperti ekor) yang ada pada turbin angin sumbu horizontal.



**Gambar 2.3: Turbin Angin Sumbu Vertikal**

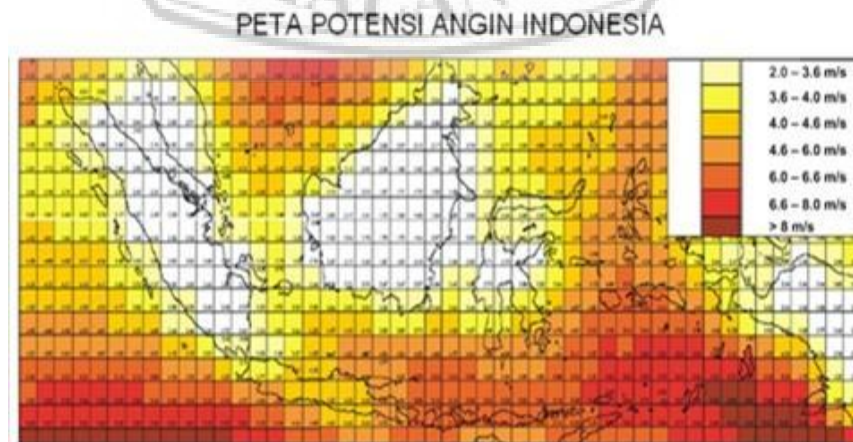
(Sumber : <http://www.pinterest.com>)

Pada penerapannya, turbin angin Savonius digunakan pada keperluan kecil dan sederhana, seperti untuk memutar pompa air. Turbin angin Savonius tidak sesuai digunakan untuk pembangkit listrik dikarenakan top speed ratio dan faktor daya yang relatif rendah. Dengan rancangan aerodinamik yang optimal, turbin angin savonius akan mencapai faktor daya yang terbesar 0,25. Turbin angin Darrieus dapat digunakan untuk pembangkit listrik karena memiliki putaran yang lebih tinggi dan faktor daya yang lebih besar dibandingkan turbin angin Savonius.

### 2.3. Potensi Angin di Indonesia

Potensi energi angin di Indonesia umumnya berkecepatan lebih dari 5 meter per detik (m/s). Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas 5 m/detik, masing-masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa.

Adapun kecepatan angin 4 m/s hingga 5 m/s tergolong berskala menengah dengan potensi kapasitas 10-100 kW.



**Gambar 2.4: Peta Potensi Energi Angin di Indonesia**

(sumber: <http://www.hijauku.com>)



Wilayah Indonesia yang berada di sekitar daerah ekuator merupakan daerah pertemuan sirkulasi Hadley, Walker, dan lokal. Kondisi ini ditengarai memiliki potensi angin yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan energi terbarukan sebagai alternatif pembangkit listrik yang selama ini lebih banyak menggunakan bahan bakar minyak bumi. Wilayah Sulawesi dan Maluku terletak di kawasan Indonesia Timur yang terdiri dari ratusan pulau kecil yang sebagian besar berpenduduk. Seiring perkembangan zaman, kebutuhan listrik di daerah tersebut semakin meningkat, untuk memenuhi kebutuhan listrik tersebut di bangun pembangkit listrik tenaga diesel yang sangat bergantung pada bahan bakar fosil dan berpotensi menimbulkan polusi terhadap lingkungan.

Indonesia, negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang di dunia yaitu  $\pm 80.791,42$  Km merupakan wilayah potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin.

Pembangkit Listrik Tenaga Angin (Wind Power), adalah pembangkit yang memanfaatkan hembusan angin sebagai sumber penghasil listrik. Alat utamanya adalah generator, dengan generator tersebut maka dapat dihasilkan arus listrik dari gerakan blade/baling-baling yang bergerak karena hembusan angin. Pembangkit ini (PLTB) lebih efisien dari pada pembangkit listrik tenaga surya didalam menghasilkan listrik. Pembangkit listrik telah ada dipasaran memiliki kapasitas Watt per jam 200, 400, 500, 1000, 2000, dan 3000 Watt.

Umumnya suatu pembangkit listrik tenaga angin/bayu (PLTB) terdiri dari beberapa komponen utama yaitu ; a) kincir angin, b) gear box, c) brake system, d) generator dan e) alat penyimpan energi.

## 2.4. Dasar Perancangan Turbin Angin

### 2.4.1 Daya

Angin adalah udara yang bergerak. Karena udara mempunyai massa maka energi yang ditimbulkannya dapat dihitung berdasarkan energi kinetik yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Energi Kinetik, } E_k = 0.5 \times m \times V^2 \dots\dots(\text{Eric Hau, 2005 : 82})$$

dimana :

$m$  = massa (kg) (1 kg = 2.2 pounds)

$V$  = kecepatan angin (m/detik) (meter = 3.281 feet = 39.37 inches)

Maka persamaan energi kinetik diatas menjadi persamaan aliran :

Tenaga pada permukaan kincir adalah:

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times V^3 \dots\dots\dots(\text{Eric Hau, 2005 : 84})$$

dimana:

$P$  = tenaga dalam watts (746 watts = 1 hp) (1,000 watts = 1 kilowatt)

$\rho$  = massa jenis udara (1.225 kg/m<sup>3</sup> pada permukaan laut)

$A$  = permukaan kincir (m<sup>2</sup>)

$V$  = kecepatan angin dalam meter/detik (20 mph = 9 m/detik)  
(mph/2.24 = m/detik)

Persamaan ini merupakan tenaga dari aliran udara secara bebas. Tidak semua tenaga ini dapat diambil karena ada aliran udara yang lewat melalui kincir (hanya dinding tegak lurus arah angin yang dapat mengambil 100%

energi aliran angin). Sehingga kita harus menurunkan persamaan baru yang lebih praktis untuk kincir angin.

Tenaga Kincir Angin :

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times C_p \times V^3 \times N_g \times N_b \dots\dots\dots$$

(Eric Hau, 2005 : 82)

dimana:

$P$  = tenaga dalam watts (746 watts = 1 hp) (1,000 watts = 1 kilowatt)

$\rho$  = massa jenis udara (1.225 kg/m<sup>3</sup> pada permukaan laut)

$A$  = permukaan kincir (m<sup>2</sup>)

$C_p$  = Koefisien kinerja (maksimum teoritis = 0,59 [Betz limit], Desain = 0,35)

$V$  = kecepatan angin dalam m/detik (20 mph = 9 m/detik)

$N_g$  = efisiensi generator (50% alternator mobil, 80% atau lebih utk permanent magnet generator)

$N_b$  = efisiensi gearbox/bearing (jika bagus dapat mencapai 95%)

## 2.4.2 Power Coefficient dan Tip Ratio

### 2.4.2.1 Power Coefficient

Merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan secara mekanik pada sudu akibat gaya angin terhadap daya yang dihasilkan oleh gaya lift pada aliran udara. Secara matematis hubungan ini dapat dituliskan :

$$C_P = \frac{P}{P_O} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

$$C_P = \frac{P}{P_O} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{V_2}{V_1} \right]$$

(Erich Hau, 2013 : 559)

dimana :

$C_P$  = Koefisien daya

$P$  = Daya mekanik dihasilkan rotor (watt)

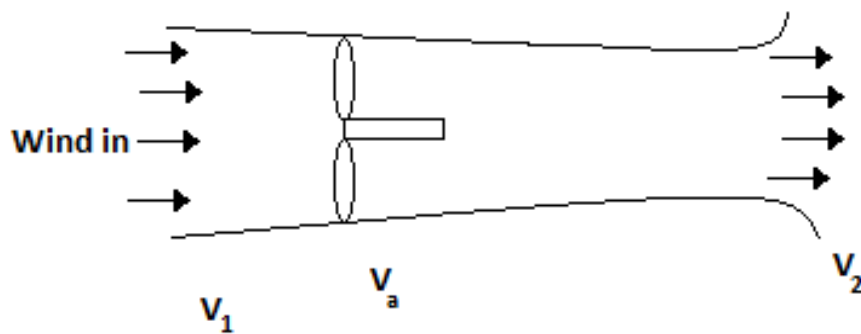
$P_O$  = Daya mekanik total yang terkandung dalam angina yang melalui sudu

$\rho$  = Massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$  = Luas penampang bidang sudu ( $\text{m}^2$ )

$V_1$  = Kecepatan aliran udara sebelum melewati sudu rotor (m/s)

$V_2$  = Kecepatan aliran udara setelah melewati sudu rotor (m/s)



Gambar 2.5: Kecepatan Udara Masuk dan Keluar Turbin

(Sumber : <http://eprints.undip.ac.id>)

Energi yang terkandung pada spin (putaran sudu) akan mengurangi proporsi penggunaan energi total yang terkandung pada aliran. Secara teori momentum, *power coefficient* dari turbin harus lebih kecil daripada harga yang ditentukan oleh Belz's (sekitar 0,593) akibat terjadinya losses pada mekanisme gerak turbin angin. Power coefficient bergantung pada rasio antara komponen energi gerak putar sudu dan gerak rotasi pada aliran udara. Rasio ini didefinisikan sebagai kecepatan tangensial sudu rotor terhadap kecepatan aksial atau kecepatan angina dan didefinisikan sebagai tip speed ratio ( $\lambda$ ), yang secara umum direkomendasikan pada kecepatan tangensial dari ujung sudu.

#### 2.4.2.2 Tip Speed Ratio

*Tip speed ratio* (rasio kecepatan ujung) adalah rasio ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas. Untuk kecepatan angin nominal yang tertentu, tip speed ratio akan berpengaruh pada kecepatan rotor. Turbin angin tip lift akan memiliki speed ratio yang lebih besar dibandingkan

dengan turbin tipe drag. Besarnya tip speed ratio dapat dihitung dengan persamaan :

$$\lambda = \frac{\pi D n}{60 v} \dots\dots\dots (\text{Eric Hau, 2005 : 84})$$

dimana :

$\lambda$  = Tip Speed ratio

$D$  = Diameter rotor (m)

$n$  = Putaran rotor

$v$  = Kecepatan angin (m/s)

### 2.4.3 Gaya Horizontal Akibat Kecepatan Angin (kg)

Untuk menghitung energi maksimal angin yaitu dengan rumus sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \dots\dots\dots (\text{Eric Hau, 2005 : 82})$$

dimana :

$P$  = Daya angin (Watt)

$\rho$  = kerapatan udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$  = Luas penampang blade ( $\text{m}^2$ )

$V$  = kecepatan angin (m/s)

Dalam hal ini dibutuhkan gaya drag lift di kali capture area untuk mengetahui gaya angin yang sesungguhnya, maka dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$P_{\text{Capture Area}} = A \times Df \dots\dots\dots (\text{Eric Hau, 2005 :86})$$

dimana :

$A$  = Luas Blade ( $m^2$ )

$Df$  = Gaya drag ( $kg/m^2$ )

Gaya  $Df$  adalah gaya yang bekerja menabrak sudu turbin secara horizontal yang dapat dihitung dengan rumus :

$$Df = P \sin \beta \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

#### 2.4.4 Pemilihan Jumlah Bilah Sudu

Jumlah sudu dapat ditetapkan berdasarkan harga satuan TSR sebagaimana tabel berikut ini;

**Tabel 2.1: Pemilihan Jumlah Bilah Sudu Berdasarkan TSR**

$\lambda$	1	2	3	4	5-8	8-15
B	6-20	4-12	3-6	2-4	2-3	1-2

### 2.4.5 Geometri Bilah Sudu

Untuk memudahkan perhitungan, jari-jari sudu dibagi menjadi 10 bagian dan diperoleh jari-jari lokal masing-masing bagian dari pusat rotor adalah sebagai berikut.

**Tabel 2.2: Harga Radius Lokal Blade**

$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$	$r_9$	$r_{10}$
0,2	0,4	0,6	0,8	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00

Untuk menghitung rasio kecepatan lokal digunakan rumus dari Djoyodihardjo (1983) sebagai berikut:

$$\lambda_{r_1} = \lambda_0 \cdot \frac{r}{R}$$

dimana :

$\lambda_{r_1}$  = Rasio kecepatan lokal

$r$  = Jari-jari lokal dari pusat rotor (m)

$\lambda_0$  = Rasio kecepatan ujung

$R$  = Radius baling-baling (m)



### 2.4.6 Desain Ekor Pengarah (Tail)

Luas daun ekor pengarah dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$A_0 = 0,16 \cdot A_r \cdot \frac{I_R}{I_V}$$

Dimana :

$A_0$  = Luas daerah ekor pengarah ( $m^2$ )

$A_r$  = Luas sapuan rotor ( $m^2$ )

$I_R$  = Jarak rotor ke sumbu vertikal menara (m)

$I_V$  = Jarak pusat daun ekor ke sumbu vertikal menara (m)

$A_r = \pi r^2$

### 2.4.7 Perencanaan Poros

Poros perlu dirancang berdasarkan pada:

1. Kekuatan (*strength*)
2. Kekakuan (*rigidity*)

#### 2.4.7.1 Poros dengan beban torsi saja

Bila poros mendapat beban momen puntir atau torsi, maka diameter poros bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan torsi.

$$\frac{T}{J} = \frac{f_s}{r}$$

Dimana :

$T$  = torsi yang bekerja pada poros (kg-cm)

$J$  = momen inersia polar dari luas penampang ( $cm^4$ )

$f_s$  = tegangan geser akibat torsi ( $kg/cm^2$ )

$r$  = jarak dari sumbu netral ke bagian terluar (cm)

- Untuk poros pejal berpenampang lingkaran,

$$J = \frac{\pi}{32} d^4$$

Sehingga momen puntir pada poros adalah :

$$T = \frac{\pi}{16} f_s \cdot d^3$$

- Untuk poros berongga,

$$J = \frac{\pi}{32} (d_o^4 - d_i^4)$$

Dimana:

$d_o$  = diameter luar

$d_i$  = diameter dalam

Dengan mensubstitusikan  $d_i/d_o = k$  , maka didapat,

$$T = \frac{\pi}{16} f_s d_o^3 (1 - k^4) \rightarrow k = \frac{d_i}{d_o}$$

- Daya yang ditransmisikan oleh poros dapat diperoleh dari :

$$P = \frac{2\pi \cdot N \cdot T}{60}$$

Dimana:

$P$  = daya (wat)

$T$  = torsi (N-m);

$N$  = kecepatan (rpm)

- Dalam transmisi belt, torsi diberikan dengan persamaan berikut:

$$T = (T_1 - T_2) R$$

Dimana:

$T_1$  = tarikan pada sisi kencang;

$T_2$  = tarikan pada sisi kendur;

$R$  = radius puli

#### 2.4.7.2 Poros dengan beban momen bending saja

Bila poros mendapat beban momen bending, maka tegangan maksimum (tarik atau tekan) diberikan oleh persamaan bending.

$$\frac{M}{I} = \frac{f_b}{y}$$

Dimana:

$M$  = momen bending (kg-cm).

$I$  = momen inersia luas penampang terhadap sumbu putar (cm<sup>4</sup>)

$f_b$  = tegangan bending (kg/cm<sup>2</sup>)

$y$  = jari-jari poros (cm)

- Untuk poros pejal berpenampang lingkaran,

$$I = \frac{\pi}{64} d^4 \text{ dan } y = \frac{d}{2}$$

Setelah disubstitusikan didapat,

$$M = \frac{\pi}{32} f_b d^3$$

- Untuk poros berongga,

$$I = \frac{\pi}{64}(d_0^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{64}d_0^4(1 - k^4) \rightarrow k = \frac{d_i}{d_0}; y = \frac{d_0}{2}$$

Bila (I) dan (y) dimasukkan ke persamaan, maka diperoleh:

$$M = \frac{\pi}{32} f_b d_0^3 (1 - k^4)$$

#### 2.4.7.3 Poros dengan kombinasi torsi dan bending

Jika poros mendapat beban gabungan torsi dan momen bending, maka poros harus dirancang berdasarkan torsi dan momen bending secara simultan. Dalam kondisi beban gabungan ini, ada dua teori yang dipakai untuk menghitung kegagalan elastik bahan, yaitu:

1. Teori tegangan geser maksimum atau *Guest's theory*.

Digunakan untuk bahan yang ulet (ductile materials) seperti mild steel.

2. Teori tegangan normal maksimum atau *Rankine's theory*.

Digunakan untuk bahan yang rapuh (brittle materials) seperti besi tuang.

Merujuk pada teori tegangan geser maksimum, maka tegangan geser maksimum pada poros,

$$f_{s(mak)} = \frac{1}{2} \sqrt{f_b^2 + 4f_s^2}$$

Dimana:

$f_b$  = tegangan bending akibat momen bending

$f_s$  = tegangan geser akibat torsi

Bila dimasukkan nilai  $f_b$  dan  $f_s$ , maka:

$$f_{s(mak)} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{32.M}{\pi.d^3}\right)^2 + 4\left(\frac{16.T}{\pi.d^3}\right)^2} = \frac{16}{\pi.d^3} \sqrt{M^2 + T^2}$$

$$\text{atau } \frac{\pi}{16} f_{s(mak)} d^3 = \sqrt{M^2 + T^2}$$

Menurut pembebanannya maka poros diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis sebagai berikut:

- a. Poros transmisi merupakan bagian mesin yang berputar, biasanya bentuk penampangya bulat, digunakan untuk memindahkan daya melalui putaran. Penerusan daya dilakukan melalui roda gigi, kopling, puli sabuk, sprocket rantai.
- b. As atau gandar bentuknya seperti poros tetapi biasanya tidak berputar, tidak memindahkan torsi, dan digunakan untuk menumpu roda yang berputar, pulley, roda gigi dsb.
- c. Spindle (poros mesin) adalah poros pendek yang merupakan bagian yang menyatu dengan mesinnya.

Hal-hal penting di dalam perhitungan poros:

1. Tegangan dan kekuatan

2. Kekuatan

- a. Kekuatan statis

- b. Kekuatan kelelahan

- c. Keandalan

### 3. Defleksi dan ketegaran (rigidity)

- a. Defleksi bengkok
- b. Defleksi puntir
- c. Slope pada bantalan dan elemen-elemen penumpu poros
- d. Defleksi geser akibat beban melintang pada poros pendek

### 4. Keterangan-keterangan poros

Di dalam perancangan pada poros kincir angin horizontal pada umumnya lebih menggunakan bahan poros = S 35 C

#### 2.4.8 Roda Gigi atau Gearbox

Roda gigi berfungsi untuk mentransmisikan daya dan putaran yaitu dari putaran tinggi ke putaran rendah ataupun dari putaran rendah ke putaran yang lebih tinggi, sehingga daya yang dihasilkan dari sudu rotor dapat ditransmisikan ke beban yang ingin di gerakkan. (Sularso, Kiyokatsu Suga: Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin).

##### 2.4.8.1 Perhitungan Dalam Roda Gigi

Dalam merancang roda gigi lurus, prosedur berikut dapat diikuti,

Beban tangensial gigi diperoleh dari hubungan berikut:

$$W_T = \frac{P.4500}{V} \times C_s$$

Dimana :

$W_T$  = beban tangensial gigi yang diijinkan (kg)

$P$  = daya yang ditransmisikan (hp)

$V$  = kecepatan keliling (m/menit)

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{100} \text{ (m/menit)}$$

$D$  = pitch diameter (cm)

$N$  = kecepatan putar (rpm)

$C_s$  = service factor (tabel)

Dalam transmisi roda gigi kita mengenal adanya input dan output , juga kita mengenal adanya Efisiensi gear. Apabila putaran keluaran output lebih rendah dari masukan input maka transmisi disebut reduksi (reduction gear), tetapi apabila keluaran lebih cepat dari pada masukan maka disebut inkripsi ( increaser gear). Kerjasama lebih dari dua roda gigi disebut transmisi kereta api (train gear).

Perbandingan input dan output disebut perbandingan putaran transmisi (speed ratio), dinyatakan dalam notasi :  $i$

$$\text{Speed ratio : } i = n_1 / n_2 = d_2 / d_1 = z_2 / z_1$$

Apabila:

$$i < 1 \quad = \text{transmisi roda gigi inkripsi}$$

$i > 1$  = transmisi roda gigi reduksi

dimana:

$n$  = Kecepatan (rpm)

$d$  = Diameter ( in)

$Z$  = Jumlah gigi

Perbandingan Gear ( Gear Ratio) variabel yang perlu diketahui :

$z$  = Jumlah gigi

$d$  = Diameter

$n$  = Kecepatan (speed)

$\tau$  = Torsi

#### 2.4.8.2 Klasifikasi Roda Gigi

Adapun roda gigi diklasifikasikan menurut beberapa hal yaitu:

1. Menurut letak poros.
2. Menurut bentuk alur gigi.
3. Menurut arah putarannya.

##### 1. Menurut Letak Poros

Pembagian roda gigi menurut letak porosnya ada tiga macam yaitu:

- a. Roda gigi dengan poros sejajar yaitu roda gigi di mana giginya berjajar pada dua bidang silinder, kedua bidang silinder tersebut

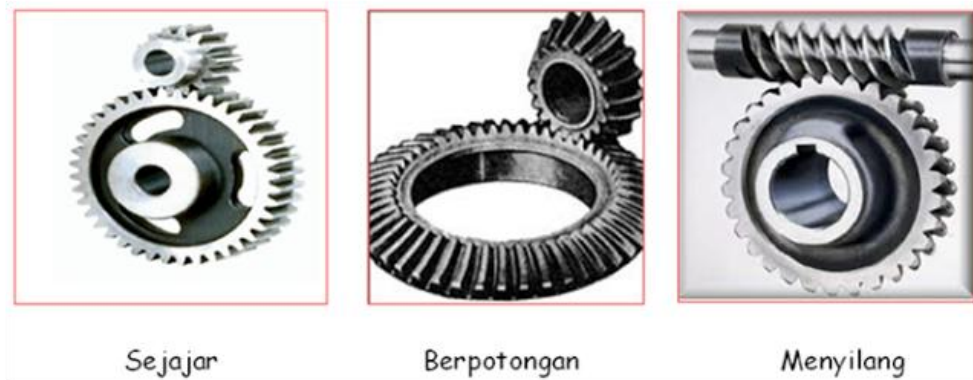


bersinggungan dan yang satu menggelinding pada yang lain dengan sumbu tetap sejajar. Adapun roda gigi yang termasuk dalam poros sejajar antara lain adalah:

- Roda gigi lurus
- Roda gigi luar
- Roda gigi miring
- Roda gigi dalam
- Roda gigi ganda
- Roda gigi pinion

b. Roda gigi dengan poros berpotongan yaitu roda gigi dimana giginya berpotongan pada dua bidang silinder dan kedua bidang tersebut bersinggungan. Adapun roda gigi yang termasuk dalam poros berpotongan antara lain adalah:

- Roda gigi kerucut lurus
- Roda gigi kerucut miring
- Roda gigi kerucut spiral
- Roda gigi kerucut miring ganda
- Roda gigi permukaan
- Roda gigi kerucut zerol



**Gambar 2.6: Roda Gigi Sejajar, Berpotongan, dan Menyilang**

c. Roda gigi dengan poros silang yaitu roda gigi yang kedua sumbunya saling bersilangan namun tidak saling berpotongan dan pemindahan gaya pada permukaan gigi berlangsung secara meluncur dan menggelinding. Adapun roda gigi yang termasuk dalam poros silang antara lain adalah:

- Roda gigi cacing silindris
- Roda gigi hiperboloid
- Roda gigi hipoid
- Roda gigi cacing samping

## 2. Menurut Bentuk Alur Gigi

Pembagian roda gigi menurut bentuk alur giginya dibagi menjadi tiga macam yaitu :

a. Roda gigi lurus yaitu roda gigi dengan bentuk alur giginya lurus dan sejajar dengan poros.

- b. Roda gigi miring yaitu roda gigi dengan bentuk alur giginya memiliki kemiringan tertentu.
- c. Roda gigi miring ganda yaitu roda gigi dengan bentuk alur giginya memiliki dua kemiringan tertentu yang sama besarnya.

### 3. Menurut Arah Putarannya

Pembagian roda gigi menurut arah putarannya dibagi menjadi dua macam yaitu:

- a. Roda gigi yang mempunyai arah putaran berlawanan terhadap roda gigi yang digerakkannya.
- b. Roda gigi yang mempunyai arah putaran yang sama dengan roda gigi yang digerakkannya.

#### **2.4.9 Sistem Furling**

##### 2.4.9.1 Pengertian Umum Furling

Side furling adalah mekanisme pengaman turbin angin pada kecepatan angin tinggi. Jika kecepatan angin sangat tinggi, ada beberapa bahaya yang mengancam turbin angin diantaranya:

1. Putaran rotor yang tinggi memberi gaya sentrifugal yang besar
2. Putaran rotor yang tinggi menyebabkan vibrasi yang tinggi

3. Angin yang besar menyebabkan gaya dorong yang besar pada struktur.

Karena alasan-alasan tersebut perlu dibuat mekanisme pengaman turbin angin saat terjadi kecepatan sangat tinggi. Pada saat ini sudah ada beberapa cara yang dikembangkan untuk mengatasi kecepatan angin yang terlampau tinggi diantaranya dengan menggunakan mekanisme pengatur sudut pitch yang bekerja berdasarkan gaya sentrifugal dan dengan menggunakan side furling.

Sistem pengendali dalam sistem ini menggunakan *tail* ( Ekor ) sebagai controler. Tail berfungsi menjaga *Blade* (sudu) tetap pada arah datangnya angin dan menghindarkan turbin dari angin yang berlebihan. Tail merupakan bagian sistem mekanik dari turbin angin ketika terjadi proses *yawing* dan *furling* .Sistem *furling* akan mencegah kerusakan pada bagian bagian turbin angin seperti pada sudu (rotor) dan generator pada saat angin bertiup kencang . Secara efektif membuat lebih aman dan memberikan pengaturan daya output turbin angin tersebut.

Sistem *Furling* manual yang akan dirancang menggunakan sebuah tuas atau lengan dan sayapnya yang bekerja secara manual untuk memutar turbin menjauhi angin yang sangat kencang. Dalam operasinya sistem furling mekanik memanfaatkan gabungan gravitasi dan gaya dorong angin untuk memutar ekor ( *furling* ) dan memutar turbin ( *yawing* ) secara bersamaan. Pada pangkal ekor terdapat sumbu *pivot* yang bekerja seperti sebuah engsel sederhana.

Rumus untuk menghitung keseimbangan antara berat ekor dan

gaya dorong turbin ( *Thrust* ):  $Thrust = \frac{D^2 \times V^2}{24}$

Dimana:

D = Diameter Sudu (m)

V = Kecepatan Angin (m/s)

#### 2.4.9.2 Prinsip Kerja Furling

*Side furling* dirancang dengan memberikan eksentrisitas pada sumbu rotasi rotor. Artinya sumbu rotasi rotor tidak berpotongan dengan sumbu *yaw mechanism*. Eksentrisitas ini diberikan agar ketika kecepatan angin cukup besar dan gaya thrust yang terjadi juga besar maka turbin angin akan mendapat momen dan gaya thrust dikalikan dengan jarak eksentrisitas yang diberikan.

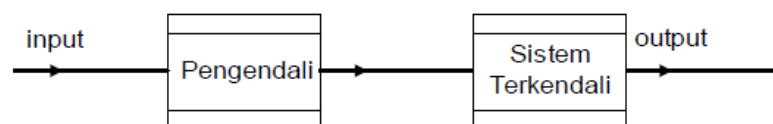
Besarnya eksentrisitas yang diberikan dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya :

1. Pada kecepatan angin berapa turbin angin harus side furling
2. Besarnya gaya pada ekor oleh kecepatan angin pada sudut tertentu
3. Sudutnya yang diinginkan untuk side furling

Faktor-faktor tersebut perlu diperhitungkan dengan beberapa kali iterasi agar mendapat nilai eksentrisitas yang sesuai. Jika nilai eksentrisitas terlampaui tinggi maka turbin angin akan mengalami side

furling sebelum kecepatan angin kritis. Side furling yang terlalu dini menimbulkan kerugian karena turbin angin tidak maksimal menyerap energi saat side furling. Namun side furling yang terlambat akan membahayakan turbin angin, artinya side furling terjadi setelah kecepatan angin lebih tinggi dan kecepatan kritis dan dapat menyebabkan turbin angin mengalami kerusakan sebelum melakukan side furling. Yang dimaksud dengan kecepatan angin kritis dalam hal ini adalah kecepatan angin yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada turbin angin. Side furling memerlukan perhitungan yang tidak sederhana. Pada tulisan ini, penulis tidak melakukan perhitungan detail untuk mendapatkan nilai eksentrisitas, tetapi mengambil contoh dan turbin angin yang sudah ada yang menggunakan metode side furling untuk memberi perlindungan pada turbin angin pada kecepatan angin tinggi.

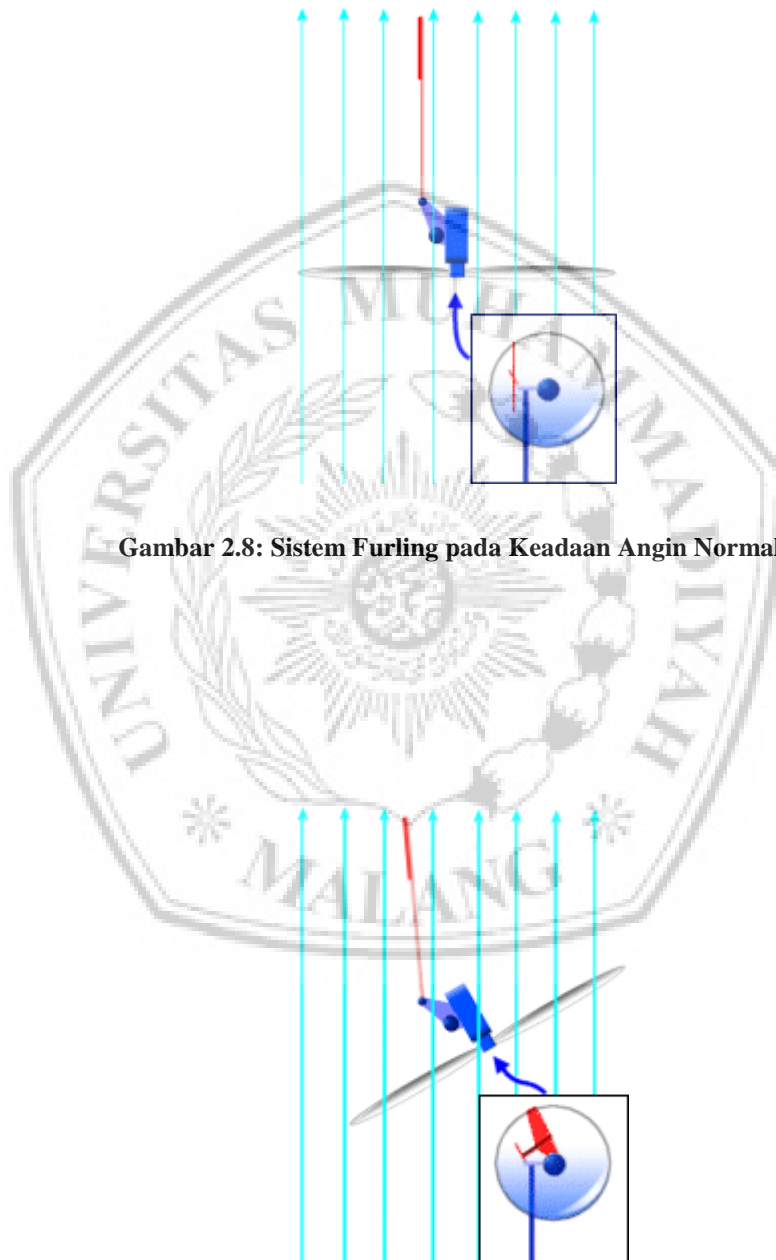
Pada pengendali kincir angin ini menggunakan teknik kendali loop terbuka, Pada sistem kendali loop terbuka gambar diagram bloknya dapat digambarkan sebagai berikut :



**Gambar 2.7: Diagram Blok Sistem Terbuka**

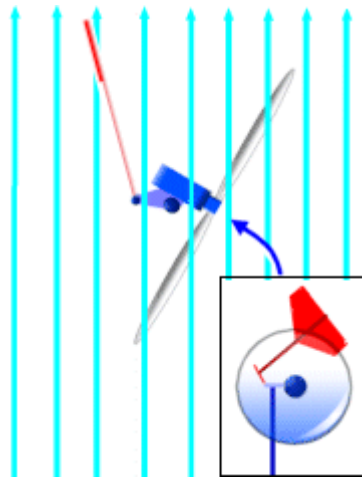
Sistem loop terbuka ini dapat diibaratkan seperti seseorang yang bekerja dengan mata tertutup, sehingga keakuratan dan ketelitian yang akan diperoleh akan sangat minimum sekali, karena pada sistem ini

elemen input yang masuk adalah tidak dipengaruhi oleh elemen output, sehingga hasil / output yang akan didapatkan adalah tergantung kepada elemen input yang masuk kepada sistem pengendali.

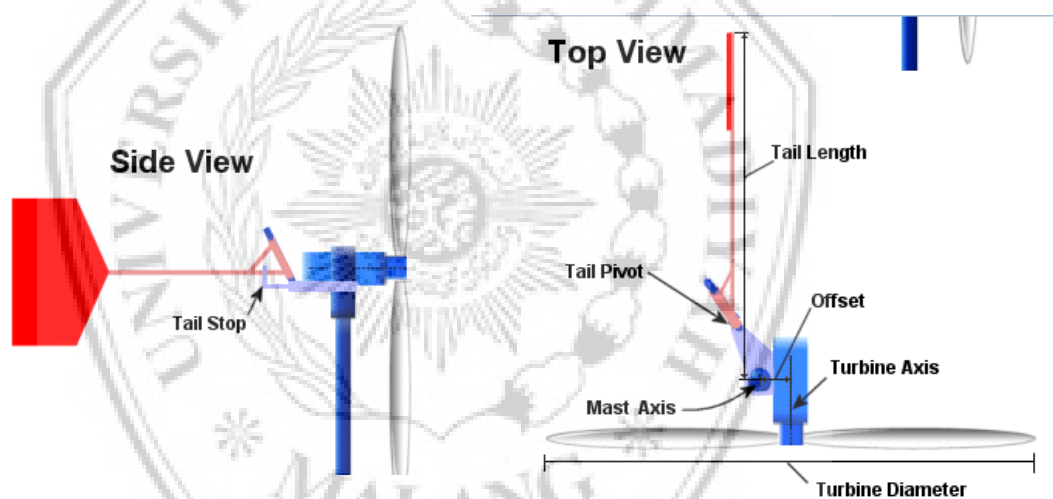


**Gambar 2.8: Sistem Furling pada Keadaan Angin Normal**

**Gambar 2.9: Sistem Furling pada Keadaan Angin Medium**



Gambar 2.10: Sistem Furling pada Keadaan Angin Badai



Gambar 2.11: Sistem Furling

Jadi, sistem side furling merupakan pengendali kecepatan putaran pada kincir angin yang terletak pada ekor ( *tail* ) dengan memberikan eksentrisitas pada sumbu rotasi rotor. Eksentrisitas ini diberikan agar ketika kecepatan angin cukup besar dan gaya thrust yang terjadi juga besar maka turbin angin akan mendapat momen.



Dalam operasinya sistem furling mekanik memanfaatkan gabungan gravitasi dan gaya dorong angin untuk memutar ekor ( *furling* ) dan memutar turbin ( *yawing* ) secara bersamaan. Pada pangkal ekor terdapat sumbu *pivot* yang bekerja seperti sebuah engsel sederhana

#### 2.4.10 Tegangan Geser

Besarnya torsi  $T$  dan gaya tangensial  $F$  dihitung berdasarkan daya  $P$  dan putaran  $n$  yang diteruskan oleh poros.

$$T = \frac{60 P}{2 \pi n} \text{ dan } F = \frac{2 T}{d}$$

(Eric Hau, Wind Turbines Fundamentals 2005 : 85)

Gaya  $F$  ini akan menimbulkan tegangan geser pada penampang pasak seluas  $A = b \times l$ , sehingga gaya ini dapat juga dinyatakan sebagai

$$F = T_g \cdot b \cdot L$$

Dimana :

$F$  = gaya tangensial (N)

$T$  = torsi ( $N_m$ )

$n$  = jumlah putaran permenit (rpm)

$d$  = diameter poros (m)

$b$  = lebar poros (m)

$L$  = lebar pasak (m)

$h$  = tinggi pasak (m)

$T_g$  = tegangan geser  $kg/m^2$